

无砂垫层真空预压法加固大面积 软土地基的实例研究

张文彬¹, 许忠发², 苏波¹, 何钜¹, 宋恩润¹, 洪雷¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210008)

摘要: 结合温州民营经济技术产业基地丁山围垦区2标3[#]区37.32万m²吹填场区应用无砂垫层真空预压法进行软土地基处理的工程实例, 介绍了无砂垫层真空预压的设计和施工过程。通过分析加固区表层沉降、孔隙水压力、静力触探试验、十字板剪切试验等实测数据, 评价了其进行软土地基处理的加固效果, 证明了无砂垫层真空预压法是一种加固大面积高压缩性软土地基的行之有效的办法, 可以取得理想的加固效果。

关键词: 无砂垫层; 真空预压; 大面积软土处理; 加固效果

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)03—0052—06

Case Study of Large Area Soft Soil Foundation Consolidation by No-sand Cushion Vacuum Preloading Method

ZHANG Wen-bin¹, XU Zhong-fa², SU Bo¹, HE Ju¹, SONG En-run¹, HONG Lei¹

(1. College of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210098, China;

2. Nanjing Yangtze River Management Office, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: Combining with the application of the no-sand cushion vacuum preloading method used in 373 200 m² of hydraulic filling field in 3[#] area of 2 tender reach in Dingshan Reclamation Zone of Wenzhou, the process of design and operation of the method is introduced here. Based on the analyses of the foundation settlement, pore pressure, static cone penetration test and vane shear test data, its reinforcement effect for soft soil foundation is evaluated. This study shows that the no-sand cushion vacuum preloading method is an efficient tool for the consolidation of highly compressive soft soil foundation with a large area, and could achieve a desired effect.

Keywords: no-sand cushion; vacuum preloading; treatment for large area soft soil; consolidation effect

0 引言

软土地基具有含水率高, 孔隙比大, 压缩性高, 透水性差等特点, 在荷载的作用下会产生较大的沉降和沉降差, 沉降持续时间也很长, 因此需对其进行处理^[1]。常规的真空预压法是在软土地基表面铺设砂垫层, 砂垫层中埋入水平滤管, 作为水平排水系统; 土体中打入竖向排水板, 构成竖向排水系统; 密封膜铺设在砂垫层上, 四周埋入土内; 通过抽真空系统, 将土体中的孔隙水由排水系统排出, 最终达到固结效果^[2-3]。原理见图1。

本工程实例依托的场地吹填淤泥平均厚度约3m。新近吹填的淤泥, 呈流塑状态, 具有很高的含水率和极低的强度, 承载力非常小, 如果用常规真空预压法进行处理, 时间上和经济上都会造成很大的浪费, 因此需要对常规真空预压法进行改进^[4]。

改进后的无砂垫层真空预压法, 是将塑料排水板与透水软管绑扎, 透水软管形成水平排水系统, 并与抽真空系统直接连接。其中透水软管和其他透水性材料(如无纺土工布)构成无砂垫层, 其功能与砂垫层相同。无砂垫层也必须具备一定的透水性能, 并能满足排出抽上来的水流量要求^[5]。原理见图2。

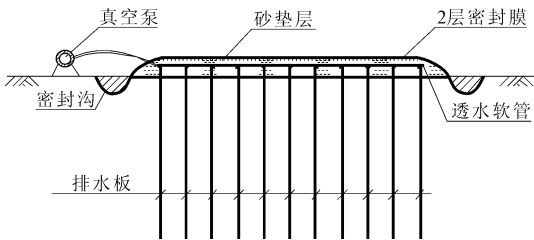


图 1 常规真空预压原理

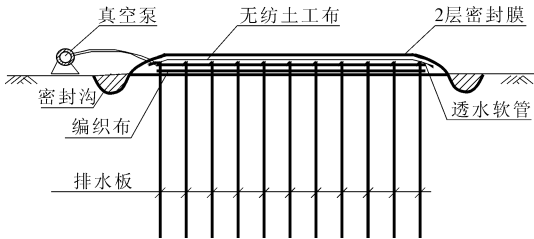


图 2 无砂垫层真空预压原理

1 工程背景

温州民营经济科技产业基地位于龙湾区境内,利用滩涂围垦工程开发建设。近期规划范围包括丁山一期围垦、天成围垦、永兴南园围垦,面积 17.7 km²;远期规划范围为龙湾二期围垦,面积 22.9 km²,

基地总面积 40 km² 以上。基地近期建设目标分两期推进:一期到 2012 年,初步完成丁山基地 7.87 km²、永兴南垦区 2.07 km² 及海城东部 1.53 km² 用地的开发,基本形成 11.47 km² 的建设规模,并完成天成围垦的填方工程,实现“七通一平”;二期到 2015 年,完成天成围垦 6.27 km² 用地的开发。

一期丁山垦区 2 标吹填及软基处理工程围区面积共约 280 万 m²,划分为 6 个区进行无砂垫层真空预压处理,编号 1[#]~6[#]。本文所研究的工程实例场区为其中的 3[#] 区,真空预压处理面积约为 37.32 万 m²。

2 地质条件

由现场勘探实验钻探揭露的地层条件,取土深度约 15 m,将地层自上而下简单分为淤泥、淤泥质粘土、粉质粘土和粘土,主要物理力学性质指标列于表 1。其中,淤泥为海底吹填淤泥,流塑状,天然含水率远大于液限含水率,饱和度接近 100%。由现场十字板剪切试验得到的不排水强度极低(小于 3 kPa),实测地基承载力小于 10 kPa,土的工程性质很差,是真空预压的主要加固区。

表 1 土层主要参数指标

土层名称	取土深度 /m	含水率 ω /%	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	压缩系数 a_v /MPa ⁻¹	压缩模量 E_s /MPa
淤泥	0~3.5	97.0	1.46	2.67	58.0	31.4	1.617	2.27
淤泥质粘土	3.5~8.8	53.0	17.20	1.58	48.2	29.0	1.264	1.98
粉质粘土	8.8~11.6	46.3	17.90	1.24	46.7	28.3	0.673	3.33
粘土	11.6~15.0	41.2	18.70	0.98	45.0	26.8	0.421	4.71

用 BT-9300H 型激光粒度分布仪对温州吹填土进行颗粒分析,测得的土样粒径级配曲线如图 3 所示,可知温州吹填土的土粒全部为粘粒,粒径均小于 0.05 mm。

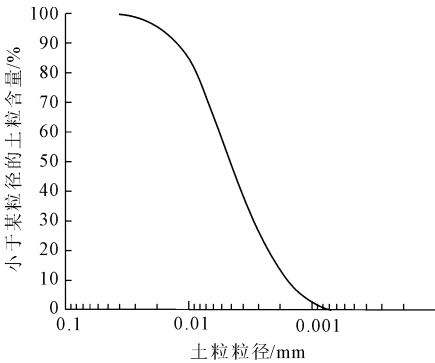


图 3 土粒粒径曲线

3 设计概况

3.1 分区

根据场地实际情况,将场地共分为 10 个区块,编号 1~10,如图 4 所示。单个区块的面积在 20 000 m²~40 000 m² 之间。根据以往经验,单个区块的面积取决于软土条件、真空泵所能提供的吸力、密封膜的质量和施工工艺等^[6]。

3.2 排水板

选用 SPB-2 型塑料排水板,其塑料排水板带宽度为 100 mm,厚度为 4 mm。纵向通水量大于等于 25 cm³/s。考虑塑料排水带影响范围的均匀性,采用正方形布置,通过计算确定,插板间距 1 m。

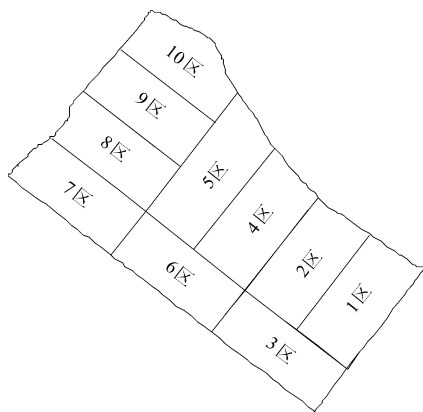


图 4 场地分区

3.3 设计要求

承载力要求:0~1.5 m 深度范围内,地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 50$ kPa。

工期要求:在吹填完工后 5 个月内完成软基处理施工。

3.4 工程难点

因吹填结束后形成的淤泥场地超软,地基承载力接近于 0,常规机械和施工方法难以进场打设插板,泥面插板施工困难。另外,由于施工区域面积较大,淤泥面上施工的安全难度大。

4 施工

无砂垫层真空预压与常规真空预压有不同的施工流程和施工工艺。另外,无砂垫层真空预压施工应特别注意上述的难点。主要施工流程如下:

4.1 预处理

软土表面通过架设浮桥保证人能够正常行走。在分区边界铺设约 30 cm 厚的轻质塑料泡沫板作为便道,宽度约 1 m,浮垫两侧按间距 2 m~3 m 插入深度约 5 m、直径约 5 cm 的毛竹,毛竹露出泥面高度约 60 cm。用铁丝将浮垫和两侧的毛竹捆扎在一起,形成整体,使之具有安全性和稳定性,能满足施工需要。人员行走或设备运送时可根据需要在浮垫上面铺设木板以增强稳定性。

4.2 打设排水板

在打设塑料排水板前,先在淤泥表面铺设一层 $150 \text{ g/m}^2 \sim 200 \text{ g/m}^2$ 编织布,主要起提供一定的承载力、防止淤泥渗入水平滤层的作用。编织布为泥面插板作业提供工作垫层。采用人工插板。

4.3 滤管铺设与连接

沿每一排排水板均铺设一条 60 mm 直径的透水软管,排水板环绕软管两周并扎紧,并用滤布或薄膜

包裹。沿透水软管垂直方向,每 30 m 左右布设一条横向连通透水管以提高整个滤层的排水通畅性和排水能力。为防止由于沉降过大产生的变形,主管每 30 m 左右用钢丝橡胶软管进行连接。透水软管用水平四通连接,透水软管外侧用匝线系好。

4.4 铺设无纺土工布

管道铺设完毕及埋设好各种观测仪器后,在其上铺设一层无纺土工布,以改善膜下真空度的传递,同时保护密封膜。土工布要求采用克重大于 150 g/m^2 的无纺土工布,用手提缝纫机缝接。

4.5 真空泵及电路安装

采用功率为 7.5 kW 的真空射流泵,空抽时须达到 96 kPa 以上的真空吸力,布泵数量按约 1 000 m^2 /台控制,配电方式为电缆分路馈送。

4.6 密封膜铺设及压膜

本工程采用两层聚氯乙烯真空密封膜(已在工厂用热粘法粘接好并运到现场),加固区四周各伸出 4 m 左右预留足够的地基沉降变形富余量。密封膜铺设结束后,四周超出区域边界的部分采用人工踩入方式,将密封膜压入淤泥中深度达 1.0 m 左右,以完成区域封闭。

4.7 抽真空

所有设备安装完毕后,先分批开启真空泵检查工作状态,合格后全部开启稳定抽真空,要求抽真空期间膜下真空度稳定在 80 kPa 以上。各区在 2009 年 12 月 18 日陆续开始抽真空,直至 2010 年 4 月 20 日,抽真空历时约 125 d。以其中 1 区平均真空度线曲线为例,如图 5,可以看出真空度基本能够维持在 80 kPa 以上。其余各区也均能够达到要求。

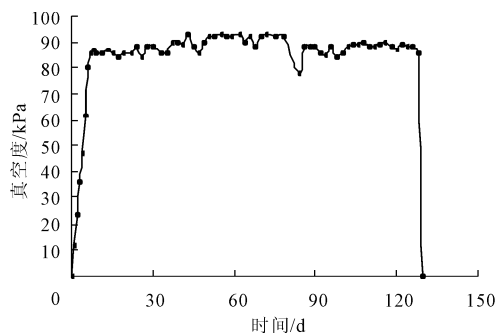


图 5 真空荷载作用曲线

5 加固效果分析

5.1 表层沉降

表层沉降是软土地基加固效果分析的基础,同时沉降数据作为工后沉降和固结度推算的依据,能

够进一步对软基处理效果进行评价。通过在场地内不同位置处布置沉降杆来记录沉降变化。图 6 为各区表层平均累计沉降曲线,可以看出,各区平均累计沉降在 60 cm~90 cm 之间,考虑到加固区淤泥厚度约为 3 m,可知真空预压的效果是显著的。

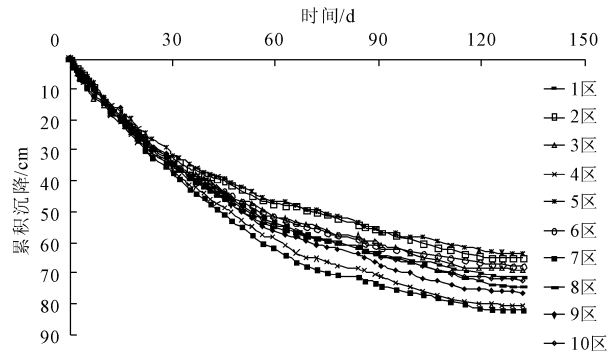


图 6 表层平均沉降曲线

图 7 为各区表层平均沉降速率曲线,可以看出,其中最大沉降速率约为 2.8 cm/d,随着抽真空的进行,各区沉降速率总体均呈减小趋势,卸载前几天内保持在 0.03 cm/d~0.13 cm/d 之间,沉降基本趋于稳定。

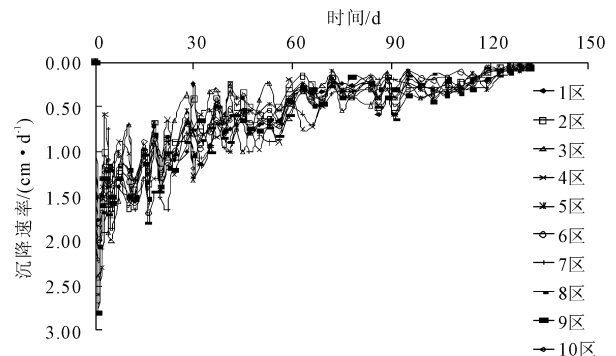


图 7 表层平均沉降速率曲线

5.2 孔隙水压力

孔隙水压力观测也是了解地基加固效果的一种手段,但由于真空预压过程中地下水位变化、曼德尔效应以及测量孔容易串气等因素的影响,孔压数据的规律往往并不理想,因此孔压分析一般作为判断加固效果的辅助手段^[6]。本实例中每个区块布置 1 个测量位置,每个测量位置埋设一个孔压计,避免了串气。

孔压测点设置在淤泥层内的 1 m、2 m 深度处。本文选取 1、4、9 三区的孔隙水压力数据绘制曲线进行说明,可以代表场地的整体情况。由图 8 可以看出,在真空预压初期,孔隙水压力有时不是消散,而是上升,并超过初始孔隙水压力,这是一定的曼德尔

效应的影响。整个抽真空期间,孔隙水压力总体呈下降趋势,与真空度从 0 上升至 80 kPa 的时间比较吻合。浅层孔压与深层孔压相比,浅层孔压下降较大,深层孔压下降较小,符合一般的抽真空规律。卸载后,孔压均恢复到静水位压力。

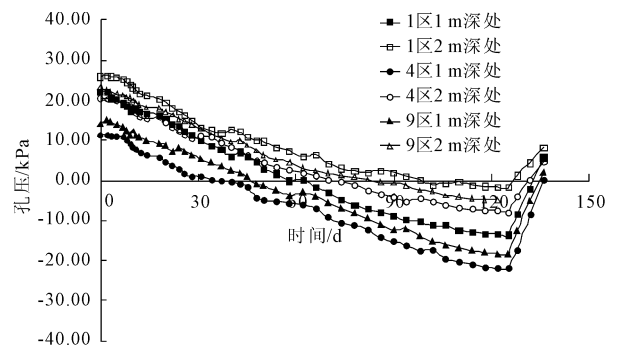


图 8 孔隙水压力曲线

5.3 静力触探试验

抽真空结束后,分别在各区内选择两个点进行静力触探试验,测点位于四根排水板所围成区域的形心处(即距离排水板最远处),本文选取 2、6、8 三区静力触探曲线进行说明,如图 9 所示。如果以 P_s (比贯入阻力)值大于 0.2 MPa 为硬壳层判断依据,则各区的硬壳层厚度大约在 1.6 m~1.7 m 之间。

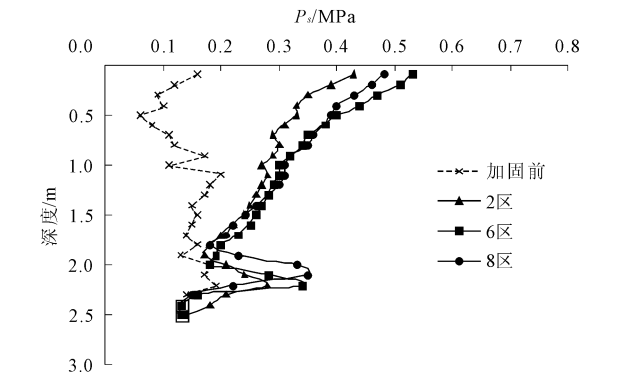


图 9 静力触探 P_s 曲线

根据静力触探结果推算地基承载力的公式很多,本文使用的是上海市工程建设规范《岩土工程勘察规范》(DGJ08-37-2002)中提供的淤泥质土地基承载力计算公式: $f_0 = 32 + 0.070P_s$ 。通过推算可知,加固后地表下约 1.5 m 范围内地基承载力基本能达到 50 kPa,符合设计要求。1.5 m 深度以下地基承载力继续减小,直到 2.1 m~2.3 m 左右出现转折,承载力大幅上升,这是由于静探到达粘土层的缘故。真空预压后的地基承载力同加固前不足 10 kPa 相比,有了显著的提高。

5.4 十字板剪切试验

对软粘土强度来说,现场十字板剪切试验是一种能够较灵敏反映软粘土强度的方法,它能比较准确直观地反映土体强度的变化,是判断土体强度增长最常用的方法。真空预压卸载后,在场地各区选择 2 个测点进行现场十字板剪切试验,本文选取 3、5、7 三区所测结果简单说明。如图 10 所示,同加固前相比,加固后土体不排水剪强度有明显的增长,反映了真空预压加固的效果。抗剪强度的变化并不十分规律,应该与吹填土本身的不均匀有关。

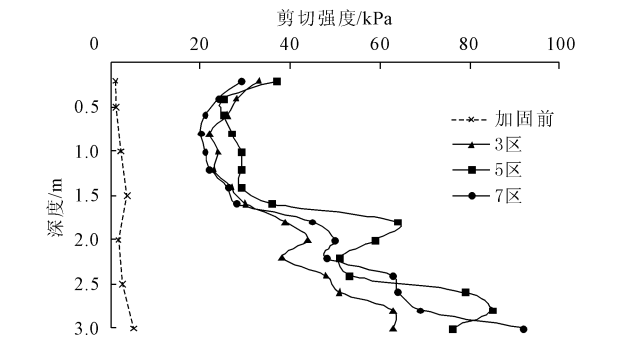


图 10 十字板剪切曲线

5.5 承载力检验

真空预压结束后,对地基承载力进行计算检验。分别在每个区块布置两个测量位置,每个测量位置于 0~0.3 m、0.6 m~0.9 m、1.2 m~1.5 m 深度处取土,测出土的性质参数,根据平均参数计算各个区块

地基承载力平均值,计算结果如表 2 所示。可以看出,各区 0~1.5 m 深度范围内平均地基承载力均达到设计要求。

表 2 承载力计算结果

区号	承载力计算			承载力平均值 /kPa	结果
	按滩涂治理工程技术规范公式计算 /kPa	按工程地质手册临塑压力公式计算 /kPa	按港口工程地质勘察规范含水率内插计算/kPa		
1	64.1	64.2	71.2	66.5	≥50kPa
2	55.5	54.9	70.6	60.3	≥50kPa
3	58.9	58.3	68.0	61.7	≥50kPa
4	63.1	63.0	70.4	65.5	≥50kPa
5	53.4	56.4	74.8	61.5	≥50kPa
6	57.0	57.3	78.0	64.1	≥50kPa
7	62.9	65.7	69.8	66.1	≥50kPa
8	54.7	54.9	71.6	60.4	≥50kPa
9	53.2	54.1	74.6	60.6	≥50kPa
10	50.2	52.7	72.4	58.4	≥50kPa

5.6 加固前后室内常规试验物理参数对比

由于设计要求承载力控制区域是 1.5 m,因此本次所取土样的深度均在 2 m 范围内,对同一区块室内常规试验物理参数取平均后,分别对 1 至 10 区加固前后的常规试验物理参数进行对比。在此,仅列出 1 区至 3 区加固前后室内常规试验物理参数,如表 3 至表 5 所示。

表 3 1 区加固前后室内常规试验物理参数对比表

	含水率 ω /%	湿密度 ρ /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	压缩系数 a_v /MPa ⁻¹	粘聚力 c_c /kPa	内摩擦角 φ_c /(°)
加固前	97.0	1.46	2.670	1.617	1.0	3.0
加固后	49.4	1.76	1.197	1.050	10.9	12.8
差值	- 49.01%	+ 20.55%	- 55.17%	- 35.06%	+ 990%	+ 326.67%

表 4 2 区加固前后室内常规试验物理参数对比表

	含水率 ω /%	湿密度 ρ /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	压缩系数 a_v /MPa ⁻¹	粘聚力 c_c /kPa	内摩擦角 φ_c /(°)
加固前	97.0	1.46	2.670	1.617	1.0	3.0
加固后	49.4	1.76	1.276	1.126	9.8	11.1
差值	- 49.01%	+ 20.55%	- 52.21%	- 30.36%	+ 880%	+ 296.03%

表 5 3 区加固前后室内常规试验物理参数对比表

	含水率 ω /%	湿密度 ρ /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e	压缩系数 a_v /MPa ⁻¹	粘聚力 c_c /kPa	内摩擦角 φ_c /(°)
加固前	97.0	1.46	2.670	1.617	1.0	3.0
加固后	51.0	1.74	1.238	1.132	10.2	11.7
差值	- 47.42%	+ 19.18%	- 53.63%	- 29.99%	+ 920%	+ 290%

可以看出,经过 125 d 的真空预压加载各个区的土的含水率、压缩系数、密度、孔隙比、粘聚力、内摩擦角都有了明显的变化,加固效果显著。

该工程实例于 2009 年 12 月 3 日开始软基处理施工,2010 年 4 月 27 日通过交工验收,质量评定为优良,工期符合要求。抽真空期间,真空度基本维持在 80 kPa 以上。场地表面平均累计沉降约为 72.27 cm,平均地基承载力为 62.5 kPa,达到设计要求;且各个区块加固效果相差不大,加固效果与各个区块加固面积无关,这说明了无砂垫层真空预压在加固大面积高压缩性软土地基时的均匀性、可靠性和稳定性,证明了无砂垫层真空预压法是一种加固大面积高压缩性软土地基的行之有效的方法,可以取得理想的加固效果。

6 结 论

通过对无砂垫层真空预压法进行软土地基处理的设计、施工过程以及加固效果介绍及现场实测资料的分析,可以得出以下结论:

(1) 对大面积吹填软土地基处理,无砂垫层真空预压法是一种行之有效的方法,在施工期内,场地表面平均累计沉降约为 72.27 cm,平均地基承载力为 62.5 kPa,达到设计要求,加固效果显著。

(2) 无砂垫层真空预压法作为在常规真空预压法基础上的改进,具备与之不同的特点。尤其是在施工中,应注意不同的施工流程和施工工艺。

(3) 无砂垫层真空预压法适用于呈流塑状态,具有很高的含水率和极低的强度,且承载力非常小

的淤泥、淤泥质粘土、污泥,克服了用常规真空预压法进行处理时,40 cm ~ 50 cm 厚砂垫层荷载加上垫层机械荷载将超过地基承载力,难以进行铺设的问题,且具有节约砂资源的优点,在类似工程中应用是可行的,在本软土地基处理实例中是成功的。

(4) 本实例中,各个区块加固效果相差不大,加固效果与各个区块加固面积无关,这说明了无砂垫层真空预压在加固大面积高压缩性软土地基时的均匀性、可靠性和稳定性,证明了无砂垫层真空预压法是一种加固大面积高压缩性软土地基的行之有效的方法,可以取得理想的加固效果。

参考文献:

- [1] 姜增国,姚志安.真空预压方法在沿海软基处理中的应用及效果分析[J].岩土工程技术,2005,19(1):36-38.
- [2] Zhu S L, Miao Z H. Recent development and improvement of vacuum preloading method for improving soft soil[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement,2002,6(2):79-83.
- [3] Gao C. Vacuum preloading method for improving soft soils of higher permeability[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement,2004,8(3):101-107.
- [4] 董江平,张雄壮,洪雷,等.无砂垫层真空预压法提高吹填淤泥地基承载力试验研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):131-133.
- [5] 董江平,张雄壮,洪雷,等.超软海底淤泥吹填地基无砂垫层真空预压处理效果研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2010,24(4):336-339.
- [6] Shang J Q, Tang M, Miao Z. Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study[J]. Canadian Geotechnical Journal,1998,35(5):740-748.